

EFEITO DO TEMPO DE CURA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MISTURAS SOLO-RCD

EFFECT OF CURE TIME ON MECHANICAL STRENGTH OF SOLO-CDW BLENDS

Batista Moreira, Eclesielter; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Mestrando, eclesielter_ebm@hotmail.com*

Arrieta Baldovino, Jair de Jesús; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Mestrando, yaderbal@hotmail.com*

Dos Santos Izzo, Ronaldo Luis; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Professor, izzo@utfpr.edu.br*

Lundgren Rose, Juliana; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, pesquisadora, julrose@gmail.com*

Rissardi, João Luiz; *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Estudante, rissardi@alunos.utfpr.edu.br*

RESUMO

A geração de resíduo de construção e demolição (RCD) tem sido reconhecida como um problema nos grandes centros urbanos suscitando problemas de preservação do meio ambiente e de aumento de custos financeiros. Estes resíduos são oriundos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e resultantes da preparação e da escavação de terrenos. Este artigo investiga a aplicação da técnica de estabilização granulométrica de solos com duas diferentes frações granulométricas de RCD, em três tempos de cura (30, 60 e 90 dias). Os principais parâmetros de controle da resistência das amostras de solo (controle) e das misturas solo-RCD foram: peso específico seco máximo (γ_d), umidade ótima (ω), CBR, compressão simples (q_u) e tração por compressão diametral (q_t) para diferentes tempos de cura. Os resultados indicam que, quanto maior a adição de RCD ao solo e maior o tempo de cura, maiores serão os incrementos de resistência. Os valores de resistência apresentados nesta pesquisa são aceitáveis para obras de pavimentação.

ABSTRACT

The generation of construction and demolition waste (CDW) has been recognized as a problem in large urban centers, causing problems of preservation of the environment and increase of financial costs. This waste comes from constructions, renovations, repairs and demolitions of civil construction works, resulting from the preparation and excavation of land. This paper investigates the application of soil stabilization technique with two different CDW granulometric fractions in three different porosities and three cure times (30, 60 and 90 days). The main parameters of resistance control of soil samples (control) and soil-CDW mixtures were: dry maximum specific gravity (γ_d), optimum moisture (ω), CBR, unconfined compression strength (q_u) and split compression tensile (q_t) for different curing times and porosity. The results indicate that the higher the CDW addition to the soil and the longer the curing time, the greater the resistance increments. The resistance values presented in this research are acceptable for paving works.

1 - INTRODUÇÃO

O uso de materiais reutilizados como o Resíduos de Construção e Demolição (RCD), cinza de casca de arroz, cinza pesada, entre outros (Moreira et al., 2017; Jiménez, 2013; 2016; Leandro, 2005; Prabakar et al., 2004) vem sendo empregados com sucesso na engenharia geotécnica para a estabilização e melhoramento mecânico em solos, principalmente em argilas e siltes. Em período recente, com o salto econômico vivenciado pelo Brasil, nota-se a necessidade de infraestruturas e têm-se por exigência construções que sejam técnica e economicamente viáveis, com o menor impacto ambiental possível. Frente a isso, verifica-se a necessidade de estudos em materiais e técnicas pouco utilizadas regionalmente, como é o caso da estabilização dos solos com RCD. A utilização de RCD se apresenta como uma alternativa interessante aos materiais convencionalmente utilizados, para promover um aumento na oferta de vias pavimentadas caracterizadas principalmente pelo baixo volume de tráfego (Moreira et al., 2017). Os atrativos principais dos agregados reciclados são os aspectos econômicos e ambientais, pois estes materiais normalmente têm seu valor de mercado inferior aos materiais naturais, além de ser um destino útil para resíduos que são normalmente depositados em aterros sanitários,

logo há a diminuição do impacto ambiental. Pesquisas sobre reciclagem de RCD são realizadas em outros países há tempos. A mistura desses materiais recicláveis ambientalmente ajuda a resolver o problema da escassez de material natural, e resolve e/ou minimiza o problema da disposição irregular de RCD.

O agregado de RCD é uma alternativa atrativa para materiais de base e sub-base de pavimentos devido à alta resistência mecânica e comportamento não expansivo (Leite et al., 2011).

Os solos da Formação Geológica de Guabirota, localizados na cidade de Curitiba-PR, Brasil, e região metropolitana, têm por sua granulometria a maioria de finos. Em grande parte, os solos da Formação Guabirota não podem ser empregados nas camadas de sub-base e base de pavimentação, para o suporte de fundações superficiais como as sapatas e para proteção de encostas. A técnica de melhoramento desse solo também pode ser utilizada nas fundações de edificações de pequeno porte, em solos com baixa capacidade de suporte ou que apresentam baixa estabilidade volumétrica (Baldovino et al., 2017).

Em qualquer técnica de aproveitamento de materiais oriundos de reciclagem é fundamental a realização de estudos preliminares, contemplando principalmente aspectos da geometria do pavimento, à natureza e modos em que se realizará a manutenção necessária durante o período de vida útil do pavimento, a caracterização dos materiais reciclados, a espessura de intervenção utilizada como base e a delimitação de teores da mistura final dos materiais a aplicar para o tipo de pavimento (Moreira, 2005). Dentro dessa perspectiva, esta pesquisa foi desenvolvida abordando a utilização dos RCD misturados à um solo da Formação Geológica Guabirota como material para camadas de pavimentação, tendo como parâmetros de controle o peso específico seco máximo (γ_d), a umidade ótima (ω), porcentagem de RCD e solo (misturas), a energia de compactação Proctor Normal (EN), e parâmetros de resposta CBR (na condição imersa), compressão simples (q_u) e tração por compressão diametral (q_c) para diferentes tempos de cura (30, 60 e 90 dias).

2 - MATERIAIS

2.1 - Solo

O solo utilizado para o estudo foi coletado em uma obra próximo à cidade de Curitiba, no município de Fazenda Rio Grande (PR), Brasil, em um local de construção de casas populares com localização geográfica 25°41'03.9"S e 49°18'32.5"W. Foi escolhido a terceira camada da Formação Guabirota, o qual é composto por 35,5% de argila (diâmetro < 0,002 mm), 39,5% de silte (0,002 a 0,075 mm) e 25% de areia (diâmetro > 0,075). A Figura 1 mostra a curva granulométrica do solo.

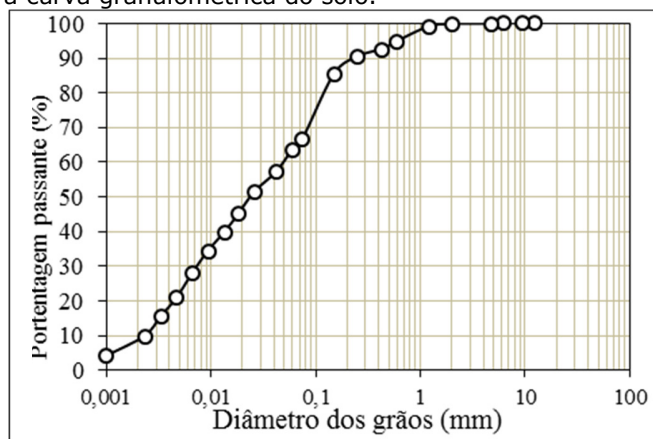


Figura 1 - Curva Granulométrica do Solo

Mostra-se no Quadro 1 as propriedades físicas do solo. Foram realizados ensaios para determinar os limites de liquidez e plasticidade; o solo apresenta um limite de liquidez alto (53,1%), tal qual o índice de plasticidade indica que a argila é altamente plástica com 21,3% ($IP > 15$), impossibilitando o seu uso em camadas de base e sub-base de pavimento rodoviário segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), conforme demonstrado no Quadro 1. A partir da granulometria e do resultado dos índices físicos, foi realizado a classificação do solo, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solo – SUCS – sendo classificado como uma silte elástico com areia (MH) e, segundo o Sistema de Classificação HRB, o solo é A-7-6 (solo argiloso). O ensaio de classificação do solo foi realizado de acordo à ASTM D2487 (ASTM 2000), os limites de Atterberg dos solos de acordo à ASTM 4318 (ASTM 2010) e a massa específica real dos grãos dos solos de acordo à ASTM D854 (ASTM 2014).

Quadro 1 - Propriedades físicas dos solos

Propriedades Físicas	Valores Médios
Massa específica real dos grãos, G_s	2,71 g/cm ³
Areia (0,075 mm < ϕ < 4,8 mm)	25%
Silte (0,002 mm < ϕ < 0,075 mm)	39,5%
Argila (ϕ < 0,002 mm)	35,5%
Limite de liquidez, LL	53,1%
Limite de plasticidade, LP	31,8%
Índice de plasticidade, IP	21,3%

2.2 - RCD

O resíduo de construção e demolição utilizado foi coletado na usina de reciclagem da cidade de Almirante Tamandaré, Região metropolitana de Curitiba. O tipo de resíduo escolhido é misto, ou seja, composto por resíduos cinzas (concreto, argamassas, etc.), vermelhos (cerâmicos) e brancos (cal, gesso, etc.). Foram escolhidas duas granulometrias de RCD: areia (material $\leq 4,8\text{mm}$) e pedrisco (material $\leq 19,1\text{mm}$); sendo realizada a granulometria do RCD, representada na Figura 2.

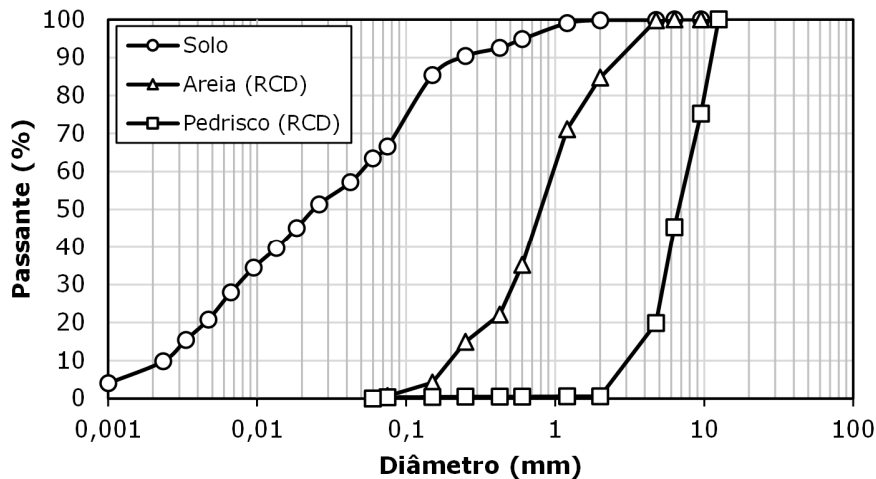


Figura 2 - Curva Granulométrica do RCD

O RCD coletado tem menos de 1% de sulfatos, mais de 90% de teor de fragmentos à base de cimento e rocha, menos de 2% de materiais não minerais, absorção do pedrisco menor que 8% e da areia menor que 13% e peso específico de 13,84 kN/m³ para o pedrisco e 13,23 kN/m³ para a areia (USIPAR, 2018).

2.3 - Água

A água empregada tanto para os ensaios de caracterização do solo, compactação, CBR, foi destilada, conforme as especificações das normas, estando livre de impurezas, evitando reações indesejadas.

3 - METODOLOGIA

3.1 - Dosagem das misturas

Foi realizado uma estabilização granulométrica para determinar o teor ótimo da mistura do solo com RCD, tendo em consideração diferentes pesquisas sobre reforço de solos com RCD, definiu-se para o presente estudo 4 teores de misturas solo-RCD. Para facilitar o estudo adotou-se as nomenclaturas: M0, M1, M2, M3 e M4; de acordo com o Quadro 2:

Quadro 2 - Dosagem dos Insumos

Mistura	Porcentagem de cada Insumo		
	Solo	Areia	Pedrisco
M0	100%	0%	0%
M1	60%	30%	10%
M2	60%	20%	20%
M3	50%	30%	20%
M4	40%	30%	30%

3.2 - Ensaios de Compactação

Foram feitos ensaios de compactação do solo na energia Proctor Normal, conforme a norma segundo a norma NBR 7182/16.

3.3 - Ensaios de Califórnia Bearing Ratio – CBR

Para os ensaios de CBR foram moldados corpos de prova conforme a norma DNIT – 172/2016 - ME. Foram moldados três corpos de prova por CBR a fim de ter um resultado estatístico. O ensaio foi realizado com a moldagem do corpo de prova na umidade ótima (ω_{ot}) e peso específico seco máximo (γ_d) encontrada no ensaio de compactação (Proctor Normal), apenas com a energia de compactação normal, usando 12 golpes do soquete padrão para o solo e para as misturas solo-RCD. O resultado final do CBR é o maior valor entre as duas penetrações no corpo de prova (0,1' e 0,2').

3.4 - Ensaios de Expansão

O ensaio de expansão obedeceu a norma DNIT – 172/2016 – ME e DNIT – 160/2012 – ME. Este ensaio foi realizado enquanto os corpos de prova do CBR estavam submersos, durante 4 dias, nos quais foram realizadas leituras para ver a expansão diária.

3.5 - Ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral

Para os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral foram moldados corpos de prova de 100mm de altura e 50mm de diâmetro. O solo foi secado totalmente em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ e logo colocando em porções uniformemente distribuídas para serem misturadas com os diferentes teores de RCD. Colocou-se a quantidade de RCD seco com referência ao peso seco da amostra do solo. Por seguinte, realizou-se a mistura de maneira que a mistura final se tornasse a mais homogênea possível. Uma porcentagem de peso de água foi adicionada na amostra de solo com RCD e misturada novamente para atingir a umidade ótima.

As amostras para a moldagem dos corpos de prova eram compactadas estaticamente em duas camadas em um molde de aço inox com diâmetro interno de 50 mm, altura de 100 mm e espessura de 5mm, para atingir o peso específico máximo aparente. Depois de ser compactada a amostra foi retirada do molde com a ajuda de um extrator hidráulico, pesando-a em sequência em uma balança de precisão de 0,01g; tomando-se suas dimensões com o uso de um paquímetro. Logo após, eram envolvidas com plástico transparente para assegurar a conservação da umidade. Por último, levou-se os corpos de prova até a câmara úmida para processo de cura durante 30 dias, com temperatura média de 25°C .

Os procedimentos dos ensaios de compressão simples seguiram a norma americana ASTM D 5102/96 e os de tração a norma ASTM C 496/C 496M – 04.

4 - RESULTADOS

4.1 - Ensaios de Compactação, CBR e Expansão

A Figura 3 mostra as curvas de compactação do solo e das misturas solo-RCD estudadas.

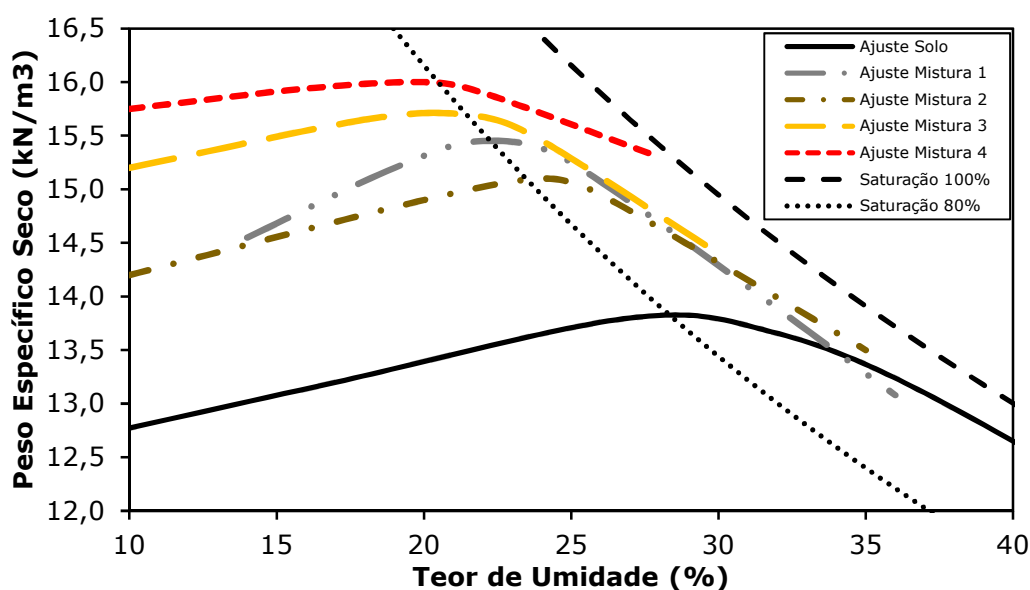


Figura 3 - Curvas de compactação da argila

Assim, também foram realizados ensaios de compactação com cada mistura usado na energia normal. O Quadro 3 apresenta-se a variação do peso específico seco máximo e a umidade ótima para diferentes misturas de RCD:

Quadro 3- Propriedades de compactação do solo e das misturas solo-RCD

Mistura	Peso específico seco máximo, γ_{dmax} (kN/m ³)	Umidade ótima, ω_{ot} (%)
M0	13,58	32,5
M1	15,21	25,2
M2	15,12	24,0
M3	15,81	21,3
M4	16,13	20,2

Percebe-se que com a adição de RCD nas misturas o peso específico seco máximo também aumenta, isso acontece em função dos agregados reciclados formarem uma matriz com o solo.

4.2 - Ensaios de CBR

Mostra-se na Figura 4 os resultados de CBR do solo e das misturas solo-RCD estudadas.

Foi observado que à medida que se aumenta o teor de RCD o CBR aumenta, com exceção de um ponto, como mostra a Figura 5. Entre a mistura M0 e M1, observa-se um patamar, demonstrando que não houve mudanças. No ensaio de CBR não houve mudanças significativas entre o Solo (M0) e a mistura M1, havendo acréscimo de valor no peso específico seco máximo. Observa-se um acréscimo de CBR conforme se aumenta a granulometria do RCD na mistura. Entre M3 e M1, houve um acréscimo de 147,85%, e de 298,34% entre M4 e M3. O aumento de M4 em relação à mistura M0 foi de 743,79%. O valor de CBR acima de 4%, podem ser usadas para reforço de subleito, e a mistura M4, com CBR maior que 20% e expansão de 1% para sub-base.

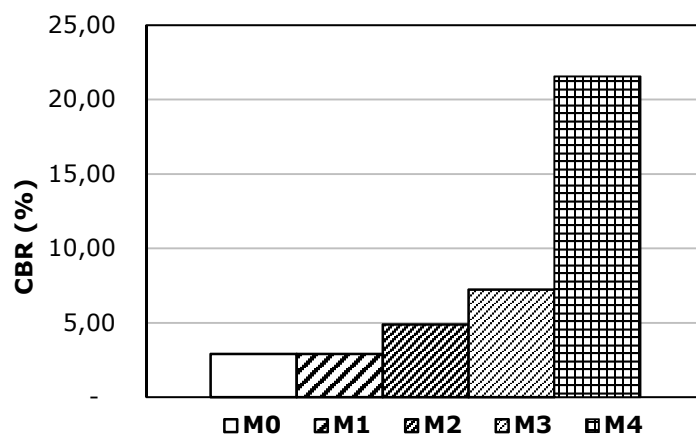


Figura 4 - Influencia do RCD nos resultados de CBR

4.3 - Ensaio de Expansão

No Quadro 4, são mostrados os resultados da expansão.

Mistura	Expansão
M0	5,61
M1	3,27
M2	2,60
M3	1,18
M4	1,00

Com base nos dados apresentados no Quadro 4, foi elaborado a Figura 5 para analisar o comportamento da expansão com a adição do RCD nas misturas.

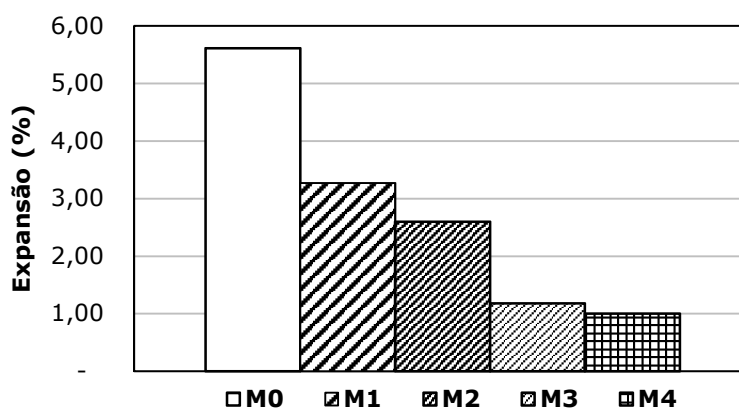


Figura 5 - Influencia do RCD nos resultados de Expansão

Observa-se um decréscimo na expansão à medida que se acrescenta o RCD, tornando a mistura mais estável na presença de água, obtendo decréscimo de até 82,17% da expansão inicial do solo. Tendo como base as normas brasileiras para camadas de pavimentos, observa-se que a partir da mistura M1, torna-se viável a utilização da mistura para pavimentos, pois com a diminuição da expansão para 3,27% e o CBR maior que 2%, a mistura M1 pode ser utilizada como subleito.

4.4 - Ensaio de Compressão Simples (q_u)

Os resultados de q_u e q_t estão ilustrados na Figura 6 (a) e (b) mostra os resultados de q_u e q_t , respectivamente, das amostras de solo e das misturas solo-RCD com a variação dos teores de RCD. Observa-se que com o aumento do peso específico seco das amostras aumenta sua resistência à compressão simples à tração.

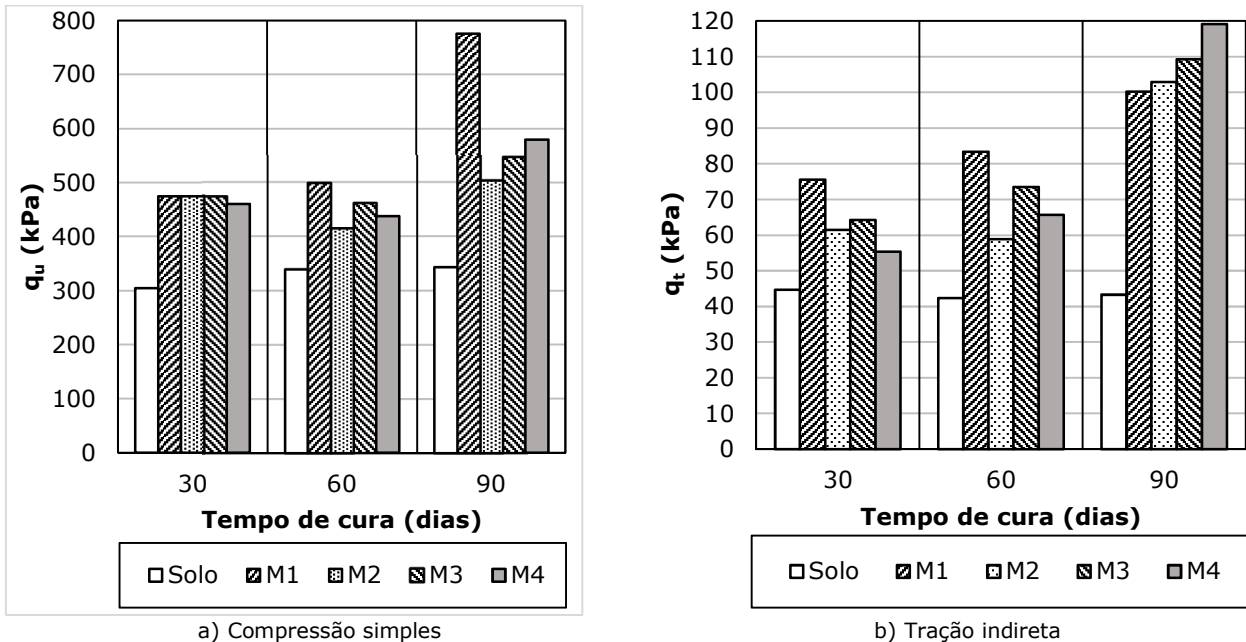


Figura 6 - Influência do RCD nas resistências q_u e q_t

A resistência à compressão simples q_u de um solo de grão fino compactado em um teor de umidade ótima pode variar de 170 kPa a 2100 kPa, dependendo da natureza do solo.

Observa-se que há incremento de resistência das misturas M1, M2, M3 e M4 com o tempo, logo conclui-se que o RCD reage com o solo ao longo do tempo, isso se dá em função de reações de materiais não inertizados do RCD, tais como cimento e cal presentes em resíduos de obras com o solo, ou seja, o tempo cura tem influência na resistência à compressão simples. O incremento de resistência à compressão simples médio para as misturas M1, M2, M3 e M4 ao longo do tempo foi de 26%. Nota-se que houve incremento de resistência com o acréscimo de RCD no solo para o tempo de cura de 30 dias. Esse acréscimo de resistência se dá em função da matriz de resistência criada entre o solo e o RCD através de uma estabilização granulométrica.

Para os resultados de q_t observa-se que o maior incremento de resistência média ao longo do tempo foi de 67%, e o incremento de resistência com 30 dias de cura foi de 43%, bem próximo dos resultados de resistência à compressão simples.

5 - CONCLUSÕES

O uso de RCD em solos finos melhoram a capacidade de suporte, haja vista que a matriz do RCD com o solo forma um novo material alterando as características originais do solo. Dessa forma, a utilização de RCD ao solo diminui a expansão do mesmo em função da redução de finos na mistura e da reação entre os componentes constituintes no resíduo, tais como cimento e cal não inertizados.

Também, conclui-se que quanto maior a incorporação de RCD ao solo, maior será o peso específico da mistura final, portanto maior será o CBR e menor será a sua expansão. Conclui-se que o acréscimo de RCD no solo aumenta a resistência a compressão simples (q_u) e à tração (q_t) em aproximadamente 50% e o tempo de cura também influencia na resistência final das misturas solo-RCD, aumentando aproximadamente 26% de resistência à compressão simples e de 67% de incremento de resistência à tração. Dentro dessas constatações, permite-se a sua utilização em camada de reforço de subleito e sub-base de pavimento. Cabe ressaltar que é fundamental a realização de estudos preliminares, tanto no tipo de solo quanto na qualidade e composição do RCD, haja vista a heterogeneidade do RCD.

AGRADECIMENTOS

Os autores demonstram agradecimento ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (PPGEC/UTFPR), ao suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação Araucária do Paraná e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

- ASTM (2000) - *ASTM D2487: "Standard classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)"*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM (2010) - *ASTM D4318: "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils"*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM (2014) - *ASTM D854: "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer"*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182. (2016) - Ensaio de compactação.
- Baldovino, J. A., Moreira, E. B., Teixeira, W., Izzo, R. L. S. e Rose, J. L. (2017) - Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. *J Rock Mech Geotech Eng*.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. DNIT 160/2012 - ME (2012) - Determinação da expansibilidade.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. DNIT 172/2016 - ME (2016) - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. DNIT (2006) - Manual de Pavimentação.
- Jiménez, J. R. (2013) - Recycled aggregates (RAs) for roads. Pacheco-Torgal, F., Tam, VWY, Labrincha, JA, Ding, Y. de Brito, J.(Eds.), *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, p. 351-376.
- Jiménez, M. A. G. (2016) - Comportamento Mecânico de um agregado reciclado a partir de resíduos de construção e demolição submetido a carregamentos cíclicos. Universidade de Brasília.
- Leandro, R. P. (2005) - Estudo Laboratorial Acerca Da Possibilidade De Aproveitamento Da Cinza Pesada De Termelétrica Em Bases E Sub-Bases De Pavimentos Flexíveis. Universidade de São Paulo.
- Leite, F. D. C., Motta, R. D. S. R., Vasconcelos, K. L. e Bernucci, L. (2011) - Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2972-2979.
- Moreira, J. P. (2005) - Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento. Dissertação (mestrado) - Universidade do Minho. Engenharia Rodoviária. Guimarães.
- Moreira, E. B., Baldovino, J. A., Izzo, R. L. S., Perretto, F. e Teixeira, W. (2017) - Estudo do efeito da adição de resíduos de construção e demolição em solo argiloso para pavimentação de baixo tráfego. XI Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Bento Gonçalves, PR.
- Prabakar, J., Dendorkar, N. e Morchhale, R. K. (2004) - Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 4, p. 263-267.
- USIPAR (2018) - Usipar - Usinas de Recicláveis Sólidos do Paraná. <http://www.usiparreciclagem.com.br/>, acessado em 04/01/2018.